

雷州半岛 3 种速生人工林下土壤生态化学计量特征

许宇星, 王志超, 竹万宽, 杜阿朋

(国家林业局 桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

摘要: 为探讨雷州半岛 3 种常见人工林尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* 林, 赤桉 *Eucalyptus camaldulensis* 林及湿加松 *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea* 林 0~60 cm 土层土壤有机碳、全氮、全磷和全钾及其化学计量学特征的变化规律, 在雷州半岛内, 选取 8 年生尾巨桉林、8 年生赤桉林和 15 年生湿加松林, 分别在各林分内设置 3 块样地, 采用 5 点法分层取样, 测定土壤有机碳、全氮、全磷和全钾, 并计算不同元素之间的计量比。结果显示: 3 种人工林 0~60 cm 土壤有机碳、全氮质量分数未产生显著差异; 赤桉林下土壤全磷质量分数显著低于湿加松林, 但尾巨桉林下土壤全磷质量分数与湿加松林未产生显著差异; 全钾质量分数表现为湿加松林 > 赤桉林 > 尾巨桉林, 桉树林下土壤全钾质量分数显著低于湿加松林 ($P < 0.05$), 导致林下土壤碳钾比、氮钾比、磷钾比均显著高于湿加松林。3 种人工林土壤有机碳及全氮质量分数随土层深度增加而显著下降 ($P < 0.05$), 碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比均对土层深度呈降低趋势, 且表层土壤 (0~20 cm) 比值均显著高于下 2 层土壤 ($P < 0.05$), 但碳氮比、磷钾比随土层深度的变化没有一致规律; 3 种人工林下土壤碳磷比均小于 200.00, 且氮磷比低于全国平均值, 说明研究区内氮质量分数相对缺乏。相关性分析表明: 土壤有机碳和土壤全氮极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数达 0.925, 土壤全磷和全钾及全氮相关性不显著 ($P > 0.05$)。该试验区内 3 种人工林生长均受氮元素限制。建议雷州半岛桉树林及松树林培育过程中, 注意对不同营养元素的平衡施肥, 防止地力衰退问题的出现。图 1 表 3 参 28

关键词: 森林土壤学; 人工林; 桉树; 湿加松; 土壤养分; 化学计量特征

中图分类号: S714.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2018)01-0035-08

Ecological stoichiometric characteristics of soil C, N, P, and K in three types of plantations on the Leizhou Peninsula

XU Yuxing, WANG Zhichao, ZHU Wankuan, DU Apeng

(China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: To provide a scientific basis for sustainable management of plantations on the Leizhou Peninsula, changes of soil organic C, total N, total P, and total K in three different kinds of plantations were explored. Three sample plots were set in *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus camaldulensis*, and *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea* plantations with the five-point sampling method employed for stratification and sampling. Concentrations of C, N, P, and K and their stoichiometric characteristics were analyzed in different plantations and soil depths. Results showed that among the three kinds of plantations, soil organic C and total N content at depths of 0–60 cm were not significantly different. Soil total P of *E. camaldulensis* plantation was significantly lower ($P < 0.05$) than *P. elliottii* × *P. caribaea* plantation, but was not significantly different between *E. urophylla* × *E. grandis* and *P. elliottii* × *P. caribaea* plantation. The content of soil total K was in the

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-02-27

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(CAFYBB2017QA032, CAFYBB2017QA033); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0600504, 2016YFD0600505); 广东省林业科技创新项目(2014KJCX021-04, 2013KJCX014-03); 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站资助项目(2016-LYPT-DW-126)

作者简介: 许宇星, 工程师, 从事桉树可持续经营研究。E-mail: wsxyx1987@163.com。通信作者: 杜阿朋, 副研究员, 博士, 从事桉树林生态等研究。E-mail: dapzj@163.com

order of *Pinus elliottii* × *P. caribaea* > *Eucalyptus camaldulensis* > *E. urophylla* × *E. grandis* with the soil C:K, N:K, and P:K ratios significantly lower ($P < 0.05$) in *Pinus elliottii* × *Pinus* than *Eucalyptus* plantations. Soil organic C and total N in the three different plantations decreased significantly ($P < 0.05$) with an increase of soil depth. The C:P, C:K, N:P, and N:K ratios decreased significantly with an increase of soil depth ($P < 0.05$), but C:N and P:K showed no consistent pattern. For the three kinds of artificial forests in the 0–60 cm depth, soil C:P was less than 200.00, and N:P, which was below the national average, demonstrated that plant growth was limited by N. Correlation analyses also showed that total N had a significant positive correlation with soil organic C ($r = 0.925$, $P < 0.01$), but was not significantly different ($P > 0.05$) from total P ($r = 0.253$) and K ($r = -0.016$). In conclusion, stand growth in the test area was limited by N and balanced fertilization was needed to prevent soil degradation in these fast-growing pine and eucalypt plantations. [Ch, 1 fig. 3 tab. 28 ref.]

Key words: forest soil science; plantations; *Eucalyptus*; *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*; soil nutrient; stoichiometry characteristics

化学计量学是化学元素平衡的科学, 强调活有机体主要组成元素(特别是碳、氮和磷)的化学计量特征关系^[1-3]。中国人工林面积居世界之首, 因林分结构单一、培育制度不健全而导致水土流失和林地生产力下降等问题日趋严重。目前, 国内对人工林生态系统内不同元素化学计量学研究颇多, 主要集中在植物器官的元素生态化学计量学特征研究。崔宁洁等^[4]总结了长江上游不同林龄马尾松 *Pinus massoniana* 人工林生态系统内碳、氮、磷分配格局及化学计量特征, 对提高马尾松人工林养分利用效率及林地生产力具有重要意义; 赵亚芳等^[5]对秦岭西主峰鳌山下 3 种不同林龄华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 针叶碳、氮、磷质量分数及其化学计量比随季节变化规律进行了比较分析, 为华北落叶松的合理经营提供理论依据。土壤作为人工林生态系统的重要组成部分, 其养分成分对速生林生长起关键作用^[6], 土壤中各元素化学计量学特征不仅反映肥力状况, 同时其比值也反映了土壤碳、氮、磷、钾的矿化和固持作用及对养分的供给能力。桉树 *Eucalyptus* spp. 和松树 *Pinus* spp. 是华南地区最重要的速生丰产林树种, 栽植面积大, 材质好且生产力高, 在中国林业建设与生态安全中发挥举足轻重的作用, 但树种结构单一、轮伐期短和连年栽植等问题已造成人工林产量逐代递减, 林地土壤理化性质变差^[7-8]。人工林地力衰退成为了制约林分生长的主要因素^[9]。本研究选取雷州半岛尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*, 赤桉 *Eucalyptus camaldulensis* 和湿加松 *Pinus elliottii* × *P. caribaea* 等 3 种常见人工林为研究对象, 对其林下土壤有机碳、全氮、全磷、全钾质量分数及生态化学计量特征进行研究, 以期揭示人工速生林下土壤碳、氮、磷、钾的分布格局及其比值变化特征, 为人工林土壤养分管理及合理科学施肥提供理论依据和数据支持。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况

研究地位于南方国家级林木种苗示范基地, 属北热带湿润大区雷琼区北缘, 海洋性季风气候, 年降水量为 1 567 mm, 5–9 月为雨季, 占全年 85.5%; 年平均气温为 23.1 °C, 年相对湿度为 80.4%; 土壤类型主要为砖红壤, 有机质质量分数 > 10.0 g·kg⁻¹, 偏酸性(pH 4.5~5.3)^[10-12]。试验林分选取种苗基地内 3 个不同速生树种(尾巨桉、赤桉、湿加松), 不同林分苗木均来源于种苗基地培育的生长均一[(25±2) cm]的网袋苗木, 造林前施用等量(666 kg·hm⁻²)专业基肥, 造林后对林分进行定期除杂维护。林分具体特征见表 1。

1.2 研究方法 与样品采集

2016 年 4 月下旬, 在备选的 3 个不同人工林林分中分别布设 3 个 20 m × 20 m 的样地, 在每个样方内以“S”形选择 5 个点取样, 使用土钻按 0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm 分层采集土壤, 仔细除去其中可见植物残体及土壤动物, 风干过筛(0.25 mm 网筛)后备用^[6]。

1.3 样品分析与数据处理

本研究中, 元素质量分数测定方法参考 LY/T 1210~1275–1999 中华人民共和国林业行业标准。有机

表 1 试验地林分概况

Table 1 Basic situation of different plantations

林分	样地坐标	海拔/m	坡度/(°)	坡向	初植密度/(株·hm ⁻²)	林龄/a	平均树高/m	平均胸径/cm
尾巨桉林	21°15'42.48"N 110°06'5.76"E	113.0	8	东	1 666	8	23.15	18.43
赤桉林	21°16'2.02"N 110°05'26.32"E	98.6	0		1 666	8	15.28	10.82
湿加松林	21°15'30.60"N 110°06'6.12"E	104.7	0		1 666	15	13.73	20.60

碳测定采用重铬酸钾氧化-容量法，土壤全氮采用凯氏定氮法，土壤全磷采用碱熔-钼锑抗比色法，土壤全钾采用碱熔-火焰光度法。数据采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析、相关分析以及多重比较、采用 Excle 2010 绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 不同人工林地土壤有机碳、全氮、全磷和全钾质量分数的变化

由表 2 可知：3 种不同人工林 0~60 cm 土壤有机碳和全氮质量分数均表现为赤桉林>尾巨桉林>湿加松林，全磷质量分数表现为尾巨桉林>湿加松林>赤桉林。其中，有机碳和全氮质量分数差异不显著 ($P>0.05$)；赤桉全磷质量分数显著低于尾巨桉林和湿加松林，全钾质量分数表现为湿加松林>赤桉林>尾巨桉林，湿加松林土壤全钾质量分数显著高于尾巨桉林和赤桉林土壤 ($P<0.05$)。

3 种不同人工林中，有机碳、全氮均随土层深度的增加而呈现下降趋势。其中，不同人工林表层 (0~20 cm) 土壤有机碳和全氮质量分数分别为 23.73~27.32 和 1.84~2.10 g·kg⁻¹，而中层土壤 (20~40 cm) 则迅速下降至 13.72~15.21 和 0.93~1.33 g·kg⁻¹，之后到下层土壤 (40~60 cm) 虽质量分数有所下降但未出现显著差异。土壤全磷和全钾质量分数随土层深度增加变化不大，除尾巨桉林表层全磷质量分数及赤桉林表层全钾显著高于中层和下层土壤，其余不同人工林各土层深度间全磷质量分数均未达到显著水平 ($P>0.05$)，不同人工林中层土壤全钾质量分数与表层和下层土壤均未产生显著差异 ($P>0.05$)。3 种人工林相同土层间有机碳和全氮均未产生显著差异，尾巨桉林与湿加松林各层土壤全磷质量分数均显著高于赤桉林土壤，而尾巨桉林和赤桉林各层土壤全钾质量分数均显著低于湿加松林土壤 ($P<0.05$)。

表 2 各人工林下不同土壤深度有机碳、全氮、全磷和全钾质量分数

Table 2 Content of organic C, total N, total P and total K of the different soil depths in 3 kinds of plantations

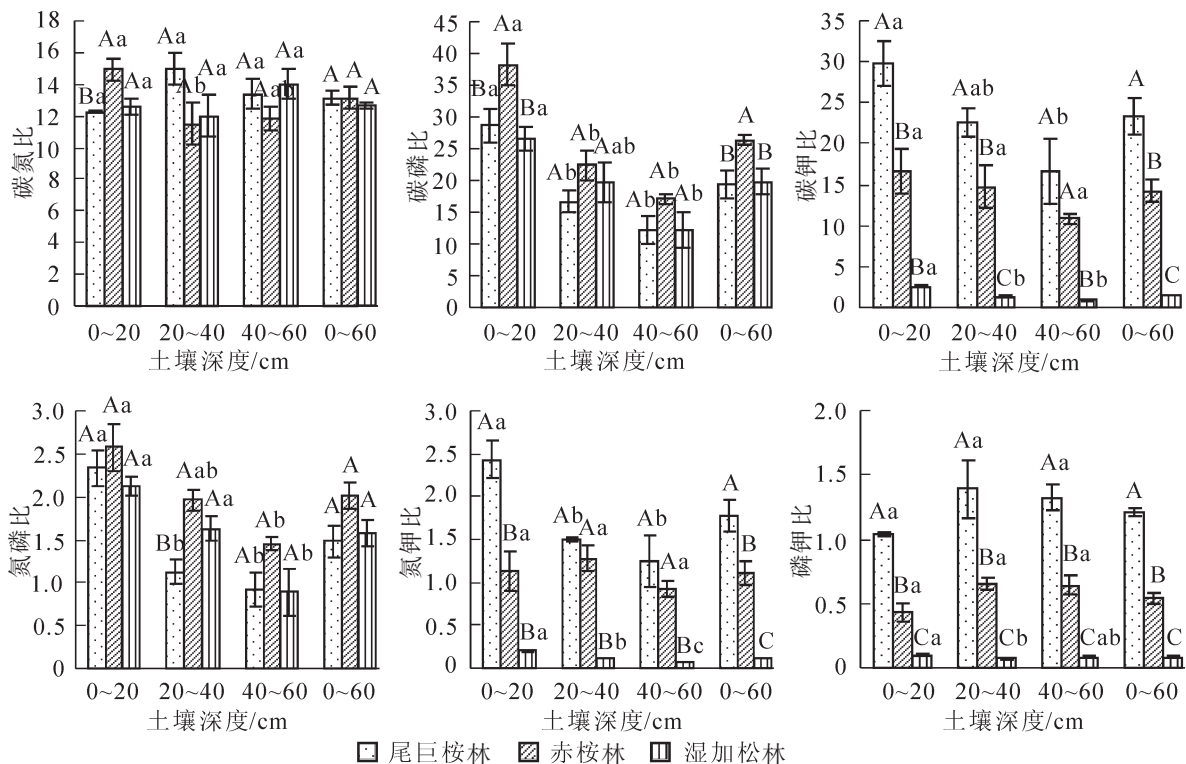
养分	林分	不同土层养分质量分数/(g·kg ⁻¹)			
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~60 cm
有机碳	尾巨桉林	25.73 ± 2.72 Aa	13.72 ± 1.33 Ab	10.23 ± 1.97 Ab	16.56 ± 1.99 A
	赤桉林	27.32 ± 2.36 Aa	15.21 ± 1.92 Ab	11.06 ± 1.14 Ab	17.86 ± 0.54 A
	湿加松林	23.73 ± 1.63 Aa	14.86 ± 2.44 Ab	9.70 ± 2.03 Ab	16.10 ± 1.12 A
全氮	尾巨桉林	2.10 ± 0.21 Aa	0.93 ± 0.13 Bab	0.77 ± 0.17 Ab	1.27 ± 0.17 A
	赤桉林	1.84 ± 0.20 Aa	1.33 ± 0.08 Ab	0.94 ± 0.09 Ab	1.37 ± 0.09 A
	湿加松林	1.88 ± 0.06 Aa	1.22 ± 0.08 ABb	0.71 ± 0.19 Ac	1.27 ± 0.07 A
全磷	尾巨桉林	0.90 ± 0.01 Aa	0.82 ± 0.02 Ab	0.84 ± 0.02 Ab	0.85 ± 0.01 A
	赤桉林	0.71 ± 0.00 Ba	0.68 ± 0.02 Ca	0.64 ± 0.03 Ba	0.68 ± 0.02 B
	湿加松林	0.89 ± 0.06 Aa	0.75 ± 0.02 Ba	0.81 ± 0.03 Aa	0.82 ± 0.04 A
全钾	尾巨桉林	0.86 ± 0.02 Ca	0.62 ± 0.10 Bb	0.64 ± 0.05 Bab	0.71 ± 0.03 B
	赤桉林	1.73 ± 0.27 Ba	1.05 ± 0.07 Bb	1.04 ± 0.17 Bb	1.27 ± 0.10 B
	湿加松林	9.21 ± 0.18 Ab	11.56 ± 0.66 Aa	10.36 ± 0.48 Aab	10.38 ± 0.40 A

说明：同列不同大写字母表示相同元素不同人工林间差异显著 ($P<0.05$)，同行不同小写字母表示相同元素不同土壤深度差异显著 ($P<0.05$)，相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)，“±”后为标准误。

2.2 不同人工林地土壤有机碳、全氮、全磷和全钾的化学计量特征

图1可以看出:3种不同人工林0~60 cm土层间土壤碳氮比和氮磷比均未产生显著差异($P>0.05$),不同人工林土层间土壤碳氮比为8.87~16.41;氮磷比为0.53~3.38。3种不同人工林0~60 cm土层间碳钾比、氮钾比、碳磷比、磷钾比均产生显著差异($P<0.05$),表现为尾巨桉林>赤桉林>湿加松林。

图1显示:3个不同人工林碳氮比、磷钾比随土层深度变化并无一致规律,主要是由植物对不同土层养分吸收利用以及土壤腐殖质对各土层养分的供应不同所导致。随着土层深度变化,3种不同人工林碳磷比、碳钾比、氮磷比、氮钾比均呈现降低趋势,且表层土壤(0~20 cm)比值均显著高于中层(20~40 cm)和下层(40~60 cm)土壤($P<0.05$),中层和下层土壤缓慢下降但未产生显著差异($P>0.05$)。其中,碳钾比、氮钾比、磷钾比各土层深度均表现为尾巨桉林>赤桉林>湿加松林。



不同大写字母表示相同土壤深度不同人工林间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一人工林不同土壤深度差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)

图1 不同深度土壤各元素化学计量比

Figure 1 Stoichiometry features of different soil depths

2.3 土壤有机碳、全氮、全磷、全钾质量分数及其化学计量比之间的相关性

表3显示:土壤有机碳和全氮极显著正相关($P<0.01$),相关系数达到0.925,有机碳与土壤全磷和全钾相关性不显著($P>0.05$);土壤全氮、全磷以及全钾间相关性均不显著。土壤有机碳与氮磷比及全氮与碳磷比均呈极显著正相关。这是因为土壤中全磷质量分数变化较稳定,氮磷比和碳磷比主要受全氮及土壤有机碳的影响,而3种人工林不同土层土壤有机碳与全氮质量分数的变化又具有一致性。

3 结论与讨论

土壤养分作为森林生态系统植物体营养元素的主要来源,其碳、氮、磷、钾质量分数及化学计量特征可影响植物体各元素平衡^[13-14]。本研究中,2种桉树林和湿加松林表层土壤(0~20 cm)有机碳和全氮质量分数未产生显著差异,土壤全磷质量分数赤桉林显著低于尾巨桉林和湿加松林,后两者未产生显著差异。2种桉树林和湿加松林下层土壤有机碳质量分数为23.73~27.32 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮质量分数为1.84~2.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷质量分数为0.71~0.90 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中,有机碳质量分数高于湖南会同7年生杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林下土壤(19.52 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[15],略低于闽南山区6年生尾巨桉人工林土壤有机碳质量分

表 3 土壤各元素质量分数及化学计量的相关性

Table 3 Correlations of soil C, N, P, K and stoichiometry features

项目	C	N	P	K	C:N	N:P	C:P	C:K	N:K	P:K
C	1	0.925**	0.243	0.038	-	0.898**	-	-	0.173	-0.231
N		1	0.253	-0.016	-	-	0.885**	0.184	-	-0.242
P			1	0.161	0.174	-	-	0.24	0.209	-
K				1	-0.059	0.016	-0.092	-	-	-
C:N					1	-0.205	0.129	0.066	-0.093	0.134
N:P						1	0.939**	0.085	0.146	-0.327
C:P							1	0.073	0.081	-0.308
C:K								1	0.981**	0.852**
N:K									1	0.801**

说明：* 表示相关性显著($P < 0.05$)，** 表示相关性极显著($P < 0.01$)，“-”表示存在自相关关系，不宜进行相关性分析。

数($28.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[16]；土壤全氮和全磷质量分数高于湖南会同 7 年生杉木人工林($1.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[15]和闽南山区 6 年生尾巨桉人工林($1.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[16]，低于广西雅长兰科 Orchidaceae 植物自然保护区土壤全氮和全磷质量分数均值($3.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[17]。可能原因在于本研究样地和闽南山区均属于亚热带地区，温度较高、降雨充沛，有利于凋落物的分解和养分循环，使土壤有机碳质量分数高于湖南会同地区杉木人工林，与闽南山区相似；而广西雅长兰科植物自然保护区虽属中亚热带季风区，且年均降水量($1\ 051.7 \text{ mm}$)低于亚热带，但保护区内森林连片分布，原生性较强，有机质积累深厚^[17]，因此有机碳、全氮和全磷质量分数均高于本研究区和闽南山区土壤。3 种人工林土壤全钾质量分数差异较明显，湿加松林下层土壤全钾质量分数($9.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于 2 种桉树林($0.86 \sim 1.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$)，可能原因在于桉树本身的速生特性对钾元素的吸收能力强于湿加松；同时，试验区雨季雨水较多，桉树人工林地除草工作频繁，容易形成地表径流，从而导致部分有机质和全氮、磷、钾养分随雨水流失^[11]。

土壤有机碳和全氮质量分数随土层深度呈下降趋势，3 种不同人工林表层土壤有机碳和全氮质量分数显著高于下 2 层土壤质量分数，之后从 20~40 cm 土层到 40~60 cm 土层虽质量分数有所下降但未出现显著差异。可能原因在于土壤有机碳主要来源于土壤表层的凋落物及其根系，这些凋落物及根系分解所形成的大量有机物及养分元素首先进入土壤表层，致使土壤表层有机质积累较多^[15]，土壤氮质量分数除来源于凋落物分解还有大气氮沉降^[14]，因此，土壤有机碳和全氮质量分数会出现较为明显的土壤层次差异。相关性分析表明(表 5)：土壤有机碳和全氮呈极显著正相关，相关系数达 0.925，与化学计量学的基本原则相符，即有机物的形成需要一定数量的氮和其他营养成分与其相应的相对固定比率的碳^[18]。土壤全磷和全钾质量分数随土层深度增加变化不大，除尾巨桉林表层土壤全磷质量分数以及赤桉林表层土壤全钾质量分数显著高于中层和下层土壤质量分数，其余不同人工林各土层深度间全磷质量分数均未达到显著水平($P > 0.05$)，且不同人工林中层土壤全钾质量分数与表层和下层土壤均未产生显著差异。可能原因在于土壤中磷元素主要来源于岩石的风化及凋落物的分解^[19]，土壤钾元素主要来源于矿物质风化、凋落物分解和降水淋溶^[20]，矿物风化作用是一个漫长而稳定的过程，对土壤中磷钾量影响较大，因而其质量分数随土层深度变化不显著，随土层深度变异性较小。

土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比是反映土壤有机质组成及土壤资源有效性的重要指标^[21]。土壤碳氮比是土壤质量的敏感指标，同时也反映了土壤不同元素的营养平衡状态^[22]。本研究中，赤桉林与湿加松林表层土壤碳氮比显著高于尾巨桉林，同时结合 3 种人工林树种生理特性及其树高与胸径生长状况(表 1)，说明尾巨桉林表层土壤具有较快的矿化作用，但有机质较快的分解可能不利于土壤养分的维持^[14]。3 种人工林 0~60 cm 土层碳氮比未产生显著差异，数值为 12.63~13.14，高于中国土壤碳氮比平均值($10.10 \sim 12.10$)^[24]，低于全球土壤碳氮比平均值 13.33^[23]。本研究区 0~60 cm 土层碳磷比为 19.40~26.36，低于中国平均土壤碳磷比(105.00)^[24]。有研究表明^[25]，当碳磷比 < 200.00 时，土壤微生物碳素会出现短暂无增加和有机磷的净矿化，从而使土壤中磷质量分数有所提升。据此说明研究区 3 种人工林土壤磷质量分数较充足。土壤氮磷比可作为养分限制类型的有效预测指标^[21]。该研究区 3 种人工林土壤 0~20 cm 土

层及 0~60 cm 土层氮磷比间未出现显著差异,但低于中国土壤氮磷比平均值 5.20^[26],说明研究区土壤中氮质量分数相对缺乏,3种人工林类型之间存在相似养分限制类型。植物生长过程中通过土壤吸收营养成分只是其中一种方式,植物还可以从凋落前的老叶通过转移再分配以及空气中吸取部分养分^[27],因此,通过土壤判断植物生长过程中的养分限制类型还需结合叶片及凋落物等的养分元素状况。我们对雷州半岛不同林龄桉树叶片、凋落物及土壤的养分元素测定并分析也发现,该研究区人工林生长受氮元素限制(另文发表)。磷钾比在3种人工林不同土层间未产生显著差异,但土壤磷钾比、碳钾比、氮钾比在3种人工林 0~60 cm 土层间均产生显著差异,可见该研究区所选人工林种类的改变对土壤中磷钾质量分数变化影响较大,但各人工林不同深度磷钾质量分数变化较小。

4 结论

通过对雷州半岛3种常见人工林土壤养分质量分数对比分析可知,2种桉树林和湿加松林表层土壤有机碳及全氮质量分数未产生显著差异,赤桉林土壤全磷质量分数显著低于尾巨桉林及湿加松林,而湿加松林土壤全钾质量分数显著高于2种桉树林下土壤;随土层深度变化,土壤有机碳及全氮质量分数逐渐下降,但全磷及全钾质量分数未产生规律性变化。该研究区内3种人工林土壤磷元素相对充足,林木生长均受氮元素限制。因此,建议雷州半岛速生人工林栽植过程中,及时补充林木生长的限制性营养元素,在提高人工林产量的同时,也可避免土壤的过度消耗。

5 参考文献

- [1] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 2 - 6.
HE Jinsheng, HAN Xingguo. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34**(1): 2 - 6.
- [2] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. *Nature*, 2000, **408**(6812): 578 - 580.
- [3] ELSER J J, DOBBERFUHL D R, MACKAY N A, *et al.* Organism size, life history, and N:P stoichiometry toward a unified view of cellular and ecosystem processes [J]. *Bioscience*, 1996, **46**(9): 674 - 684.
- [4] 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔, 等. 不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(2): 188 - 195.
CUI Ningjie, LIU Xiaobing, ZHANG Danju, *et al.* The distribution pattern of carbon, nitrogen and phosphorus and the stoichiometry characteristics of *Pinus massoniana* plantation in different ages [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23**(2): 188 - 195.
- [5] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松针叶碳、氮、磷含量及化学计量比的季节变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(5): 1328 - 1335.
ZHAO Yafang, XU Fuli, WANG Weiling, *et al.* Seasonal variations of leaf C, N, P contents and stoichiometry of *Larix principis-rupprechtii* [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2015, **21**(5): 1328 - 1335.
- [6] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(15): 4674 - 4682.
ZHU Qiulian, XING Xiaoyi, ZHANG Hong, *et al.* Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hillygully region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(15): 4674 - 4682.
- [7] 白小芳, 徐福利, 王渭玲. 中国落叶松人工林地力衰退与施肥研究综述[J]. 世界林业研究, 2016, **29**(1): 75 - 79.
BAI Xiaofang, XU Fuli, WANG Weiling. Research advance on soil degradation and fertilization of larch plantations in China [J]. *World For Res*, 2016, **29**(1): 75 - 79.
- [8] 于福科, 黄新会, 王克勤, 等. 桉树人工林生态退化与恢复研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(2): 195 - 200.
YU Fuke, HUANG Xinhui, WANG Keqin, *et al.* An overview of ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2009, **17**(2): 195 - 200.

- [9] 张昌顺, 李昆. 人工林地力的衰退与维护研究综述[J]. 世界林业研究, 2005, **18**(1): 17 – 21.
ZHANG Changshun, LI Kun. Advance in research on soil degradation and soil improvement of timber plantations [J]. *World For Res*, 2005, **18**(1): 17 – 21.
- [10] 周群英, 谢耀坚, 何国达, 等. “根太阳”生根剂在桉树扦插育苗中的应用[J]. 林业科技开发, 2004, **18**(3): 50 – 52.
ZHOU Qunying, XIE Yaojian, HE Guoda, *et al.* Application ‘root sun’ on raising rooting rate of *Eucalyptus* spp. [J]. *China For Sci Technol*, 2004, **18**(3): 50 – 52.
- [11] 钟继洪, 李淑仪, 蓝佩玲, 等. 雷州半岛桉树人工林土壤肥力特征及其成因[J]. 水土保持通报, 2005, **25**(3): 44 – 48.
ZHONG Jihong, LI Shuyi, LAN Peiling, *et al.* Characteristics and causes of soil fertility under *Eucalyptus* plantations in Leizhou Peninsula [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2005, **25**(3): 44 – 48.
- [12] 王志超, 杜阿朋, 陈少雄. 3 种整地措施下尾巨桉幼林生长及土壤有机质变化特征研究[J]. 桉树科技, 2014, **31**(4): 38 – 42.
WANG Zhichao, DU Apeng, CHEN Shaoxiong. Tree growth and soil organic matter characteristics under different soil preparation methods in young *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* stands [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2014, **31**(4): 38 – 42.
- [13] 陈亚梅, 刘洋, 张健, 等. 巨桉混交林不同树种 C, N, P 化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(8): 2096 – 2102.
CHEN Yamei, LIU Yang, ZHANG Jian, *et al.* Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of different tree species in *Eucalyptus grandis* mixed plantation [J]. *Chin J Ecol*, 2015, **34**(8): 2096 – 2102.
- [14] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 等. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(1): 17 – 23.
PANG Shengjiang, ZHANG Pei, JIA Hongyan, *et al.* Research on soil ecological stoichiometry under different forest types in northwest Guangxi [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, **31**(1): 17 – 23.
- [15] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, **51**(7): 1 – 8.
CAO Juan, YAN Wende, XIANG Wenhua, *et al.* Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan Province, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(7): 1 – 8.
- [16] 樊后保, 袁颖红, 廖迎春, 等. 闽南山区连续年龄序列桉树人工林土壤养分动态[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15**(6): 756 – 760.
FAN Houbao, YUAN Yinghong, LIAO Yingchun, *et al.* Soil nutrient dynamics in sequentially aged *Eucalyptus* plantations in mountainous region of southern Fujian, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2009, **15**(6): 756 – 760.
- [17] 黄承标, 冯昌林, 李保平, 等. 广西雅长兰科植物分布区土壤理化性质[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(1): 56 – 59.
HUANG Chengbiao, FENG Changlin, LI Baoping, *et al.* Soil physical and chemical properties in a distribution region of *Arethusa* in Yachang, Guangxi Province [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38**(1): 56 – 59.
- [18] STERNER R W, ELSEY J J. *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002: 225 – 226.
- [19] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, **30**(23): 6581 – 6590.
LIU Wande, SU Jianrong, LI Shuaifeng, *et al.* Stoichiometry study of C, N and P in plant and soil at different successional stages of monsoon evergreen broad-leaved forest in Pu'er, Yunnan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(23): 6581 – 6590.
- [20] 秦娟, 孔海燕, 刘华. 马尾松不同林型土壤 C, N, P, K 的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, **44**(2): 68 – 76, 82.
QING Juan, KONG Haiyan, LIU Hua. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different *Pinus massoniana* forests [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2016, **44**(2): 68 – 76, 82.
- [21] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3937 – 3947.

- WANG Shaoqiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(8): 3937 – 3947.
- [22] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1407 – 1414.
- ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, *et al.* Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain maize belt [J]. *Environ Sci*, 2011, **32**(5): 1407 – 1414.
- [23] POST W M, PASTOR J, ZINKE P J, *et al.* Global patterns of soil nitrogen storage [J]. *Nature*, 1985, **317**(6038): 613 – 616.
- [25] 孙超. 基于生态化学计量学的草地退化研究: 以大安市姜家甸草场为例[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- SUN Chao. *Study on Grassland Degeneration based on Ecological Stoichiometry: A Case Study of Jiangjiadian Meadow in Da'an City* [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [26] 贾宇, 徐炳成, 李凤民, 等. 半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应[J]. 生态学报, 2007, **27**(1): 42 – 47.
- JIA Yu, XU Bingcheng, LI Fengmin, *et al.* Availability and contributions of soil phosphorus to forage production to forage production of seeded alfalfa in semiarid Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27**(1): 42 – 47.
- [27] TIAN Hanqin, CHENG Guangsheng, ZHANG Chi, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1/3): 139 – 151.
- [28] 高三平. 天童常绿阔叶林不同演替阶段 N, P 化学计量学研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- GAO Sanping. *Study on Leaf N, P Stoichiometry of Evergreen Broad-leaved Forest in Successional Stages in Tiantong National Forest Park* [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.